

三次元エネルギー分布に基づく 石礫流の流下・発達に関する研究

加藤 宏季¹・福岡 捷二²

¹ 学生会員 中央大学理工学研究科 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a17.jnt5@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: sfukuoka001t@g.chuo-u.ac.jp

本研究は、石礫流による溪床・溪岸侵食を伴って流下する石礫流の流下機構を運動量とエネルギーの両方の観点から考察し、土石流研究の地平を開くことを狙いとしている。まず、石礫流 head 部が侵食した石礫粒子群を取り込み、成長・発達する機構や石礫粒子群を取り込んだことによる石礫流 head 部の流れ場への影響を運動量の観点から明らかにした。次に、石礫流流下の全体像を見るために APM 法により解析された流れと石礫の時空間変化の値を用いてエネルギー的考察を行った。侵食・崩落や石礫の堆積により石礫流のエネルギーが局所的に高まり、高まったエネルギーによって堆積した石礫粒子群が再流動するとエネルギーが解放されるといったエネルギーの貯留・放出過程が石礫流の流下・発達の重要な流下機構であることを明らかにした。

Key Words: debris flow, APM method, three-dimensional energy distribution, energy storage and release mechanism

1. 序論

土石流は溪岸や溪床を侵食し、侵食した土砂礫群を取り込むことにより成長・発達し、時には巨大な土砂災害を引き起こす。そのため、土石流の成長・発達機構の解明は重要課題となっている。

欧ら¹⁾は、土石流の発達過程を実験的に検討し、縦断的な流速分布形の違いや後続流部における侵食された土砂が流速の速い表層部に乗って先端部に到着すること、先端部の移動速度は発達中でも移動距離によらずほぼ一定値となる傾向があることを示している。江頭ら²⁾も、土石流の発達過程を実験的に検討し運動量保存に基づき溪床粒子群の侵食・移動について、現地に適用し論じている。Pudasaini and Krautblatter³⁾は、landslides-rocket-equation を導き、侵食され動き始めた溪床粒子群を土石流に取り込むことによる土石流の発達機構を理論的に検討している。しかし、これらの研究は溪岸の侵食・崩落については検討されていない。

福田・福岡⁴⁾は、LES による三次元運動方程式と個別要素法を用いた APM (Arbitrary Particle Multiphase)法を用いて溪岸・溪床侵食を伴う土石流の流動を詳細に分析した。

この研究によって、溪岸の崩壊や侵食プロセスは三次元運動方程式によって解析できることを示したが、この解析手法では、なぜその場で侵食や崩壊が起こるのか、不連続的な土石流の発達プロセスの全体を捉えるのには大変な労力を伴うことが明らかになった。福田・福岡⁴⁾の解析結果は、このような土石流の不連続な破壊現象の大局的取り扱いには、運動方程式と共に三次元的エネルギー分布の考え方が必要との認識を与えることとなった。

このような一連の研究の過程の中から、福岡ら⁵⁾は超過洪水流において三次元エネルギー分布の重要性を示した。すなわち、洪水の巨大なエネルギーを考えた河道設計が必要であること、河道の縦横断面形は抵抗の小さい船底形河道が望ましいことを論理的に示した。

河川の洪水流以上に大きなエネルギーを持って溪岸・溪床の侵食・崩壊といった激しい破壊現象を伴い流下する土石流は、図-1 に示すようにエネルギー水頭高さ分布が水面高さ分布よりも著しく高い流動特性を持っている。このような大規模な発達プロセスを有する土石流は、エネルギー的に捉え説明することが必要である。

著者らは前報⁷⁾より、溪岸・溪床侵食を伴って流下する石礫流の流下機構を運動量とエネルギーの両方の観点

表-1 前報⁷⁾において明らかになったことや課題と本報で新しく明らかにする点

観点	前報 ⁷⁾		本報で明らかにすること
	明らかにしたこと	課題	
運動量	<ul style="list-style-type: none"> 石礫流先端到達後、しばらくすると侵食が発生する流動特性を持つことを示した。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食され動き出した粒子群がどのようにして head 部まで輸送されるのかは未解明。 	<ul style="list-style-type: none"> 溪岸からの土砂供給も重要であることを数値実験から示す。 動き出した粒子群が head 部に取り込まれる機構を明らかにする。
エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> 堆積・再流動による比エネルギーの貯留・解放機構があることを示した。 	<ul style="list-style-type: none"> 一次元的な検討であり、石礫流の流動の全体像を捉えるに留まっていた。 比エネルギーでみているため、勾配による水頭の変化が考慮されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 三次元的に検討する。 局所的なエネルギーの貯留・解放機構が不連続的に起こる石礫流の重要な流下機構であることを示す。

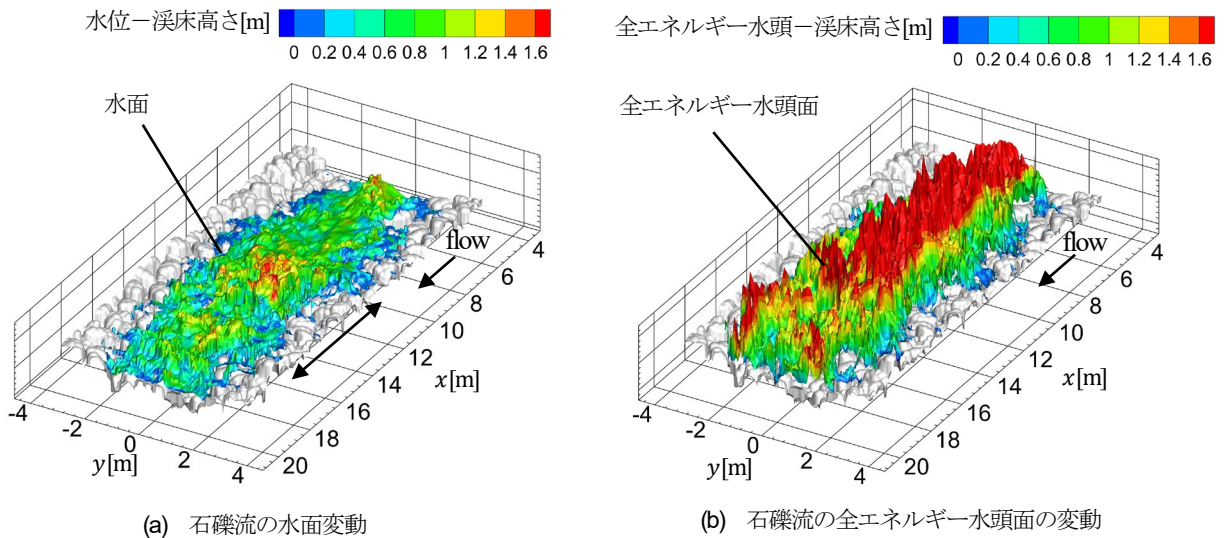


図-1 10秒時点における石礫流の水面変動と全エネルギー水頭面の変動

から総合的に考察しているが、前報と本報では結果の解釈や考え方が大きく進展している。表-1は、前報で明らかにしたことや課題、そして本報で明らかにすることについてまとめている。前報では、溪床・溪岸を構成する石礫粒子が侵食されるタイミングや、一次元的な検討により、石礫流は石礫粒子群の堆積・再流動に伴うエネルギーの貯留・解放機構を持つことを示した。本報では、始めに、溪床だけでなく溪岸からの土砂供給が重要であることを数値実験より示し、動き出した粒子群が body 部から head 部(段波状を呈し、巨石が集積する箇所)に輸送される機構を運動量の観点から明らかにする。次に、石礫流のもつエネルギーの三次元分布に基づき局所的なエネルギーの貯留・解放機構が不連続的に起こる石礫流の重要な流下機構であることを示す。

2. 数値解析法と数値実験条件

本研究では、Fukuoka ら⁸⁾によって構築された、非球

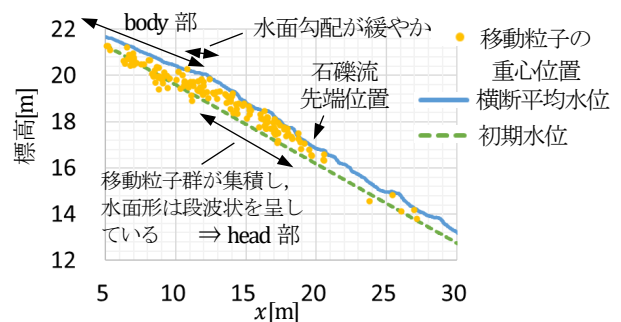


図-2 10秒時点における水面形及び移動粒子の重心位置

形粒子も解析可能な resolved Euler-Lagrange 型モデル (APM 法)を用いる。Fukuda and Fukuoka⁹⁾は、伊藤ら¹⁰⁾による水路実験で測定された土石流粒子速度と土砂輸送濃度の鉛直分布及び水と土砂の輸送量等を APM 法を用いて説明し、解析の有効性を示している。本研究では、最小粒径に対して 1/4 の計算格子サイズを用いることにより十分詳細な流れ場と粒子運動の流下過程のデータが得られる。そして、そのデータを用いることで後述の式(2)で示す石礫流のエネルギー水頭の形でエネルギーの三次元分布を求め、エネルギーの変化過程を解明する。

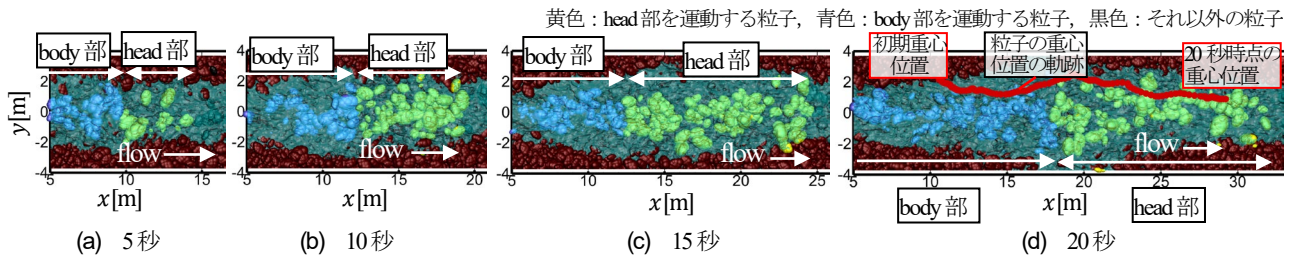


図-3 5秒, 10秒, 15秒, 20秒時点における石礫流流動の様子

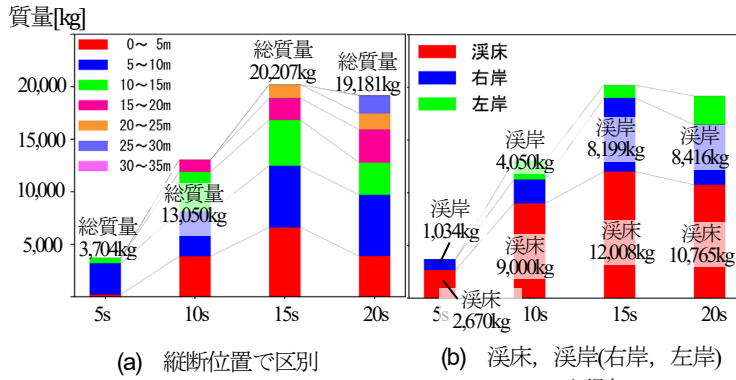


図-4 石礫流 head 部を運動する粒子群の生産位置ごとの質量

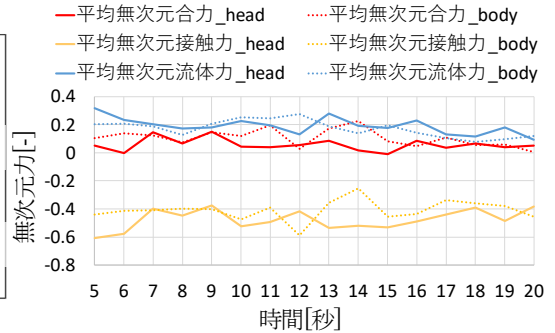


図-5 石礫流 head 部と body 部を構成する粒子群に作用する無次元合力, 無次元流体力, 無次元接触力それぞれの平均値の時間変化

APM 法の基礎方程式や, 数値実験条件, 解析に用いたパラメータなどは文献⁷⁾⁸⁾を参照されたい。

3. 運動量に基づく石礫流の成長・発達機構

最初に石礫流発達の力学機構を APM 法を用いて解く。個々の粒子の運動を解析しているため, 個々の粒子に作用している重力, 流体力や接触力の時系列データが得られている。本研究では, 粒子群全体としての力学機構を明らかにすることを目的とするため, 個々の粒子群に作用する流体力や接触力等を, その瞬間に head 部を運動する粒子群と body 部を運動する粒子群それぞれで平均して検討する。この平均化手法については, 3 章 2 節で述べる。

本研究では, 移動粒子が集積し, 水面形は段波状を呈している区間を石礫流 head 部, それより上流区間を body 部と定義する。図-2 に, 10 秒時点における横断平均水位及び移動粒子の重心位置を示す。10 秒時点においては, $12.0 \leq x \leq 19.5[m]$ に移動粒子が集積し水面形は段波状を呈しており, この区間が石礫流 head 部である。それより上流部($x < 12.0[m]$)が body 部である。図-3 に, それぞれの時間における石礫流流動の様子を示す。移動粒子群が見えるように水面を透過し示している。黄色い粒子が各時間における head 部を運動する粒子, 青色の粒子が各時間における body 部を運動する粒子, 黒色の粒子がそれ以外の粒子である。また, 図-3(d)には, 溪岸(左岸)から生産された粒子の重心位置の軌跡も示している。また, $y < -1.5[m]$ を右岸, $-1.5[m] \leq y \leq 1.5[m]$

を溪床, $y > 1.5[m]$ を左岸とする。

本数値実験での石礫流の水面形や流量ハイドログラフ, 流砂量ハイドログラフは前報⁷⁾で示されており, 石礫流先端位置は, 5秒, 10秒, 15秒, 20秒時点でそれぞれ $x = 12.0[m]$, $x = 19.5[m]$, $x = 24.5[m]$, $x = 33.0[m]$ である。図-1は, これより求められた10秒時点における石礫流の水面変動と全エネルギー水頭面の変動を示す。

(1) 石礫流の成長・発達に寄与した溪岸侵食礫量

図-4に, 5秒, 10秒, 15秒, 20秒時点における石礫流 head 部を運動する粒子群が生産された領域ごとの質量を示す。本研究では, 個別要素法を用いて個々の粒子運動を追跡しているため, 図-3(d)に示すように, 粒子の運動軌跡を追え, それぞれの粒子がどこで生産されたのかわかる。図-4は, それぞれの時間においてその瞬間に石礫流 head 部を運動する粒子群(図-3における黄色い粒子群)を生産領域ごとに分類し, その質量を数えている。図-4より, 石礫流 head 部の粒子の総質量は15秒時点まで増加し, 15秒から20秒にかけてはほとんど変化していない。石礫流 head 部は15秒時点まで成長・発達していることがわかる。図-4(a)より, 5秒から15秒の間に10mより上流で生産された礫の量が増加しており, 上流からの土砂供給により石礫流 head 部が成長・発達していることがわかる。図-4(b)より, 発達の初期段階では, 溪床より生産された礫群が石礫流 head 部を構成する粒子の大半を占めている。その後, 石礫流 head 部を構成する粒子群の総質量が大きくなるにつれ, 溪岸から生産された礫群が多くなっている。20秒

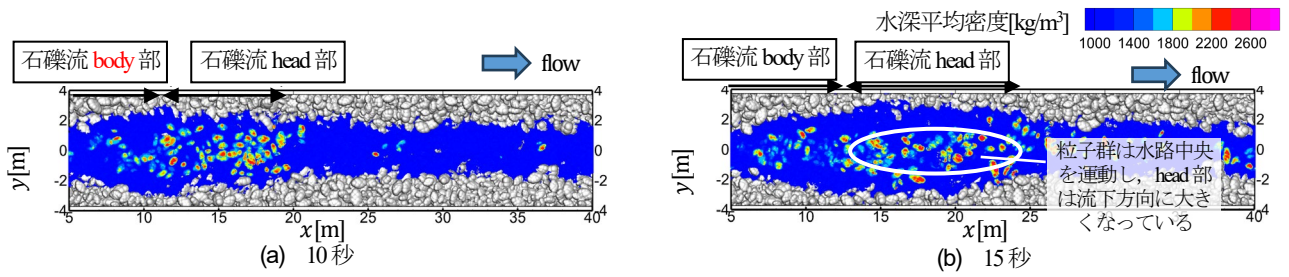


図6 10秒時点と15秒時点における石礫流の水深平均した密度分布

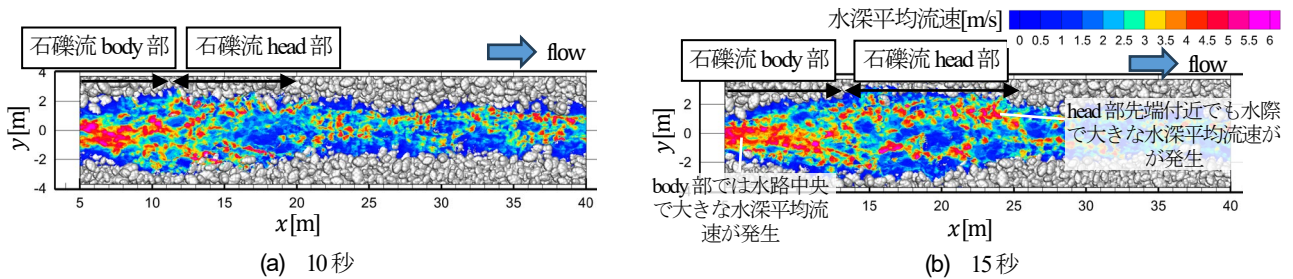


図7 10秒時点と15秒時点における石礫流の水深平均流速分布

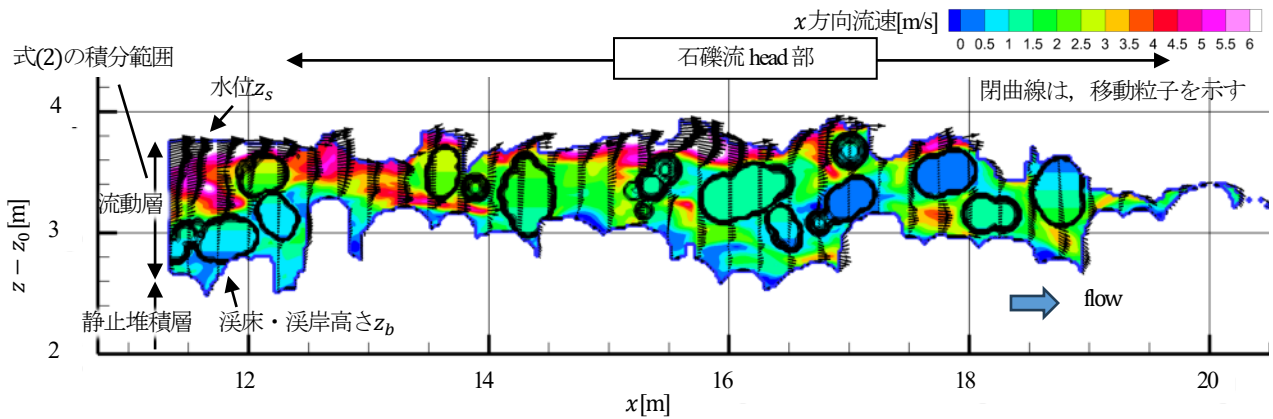


図8 10秒時点における水路中央断面内のx方向流速分布

時点においては石礫流 head 部を構成する粒子群の半数近くが溪岸から生産されており、溪岸侵食が石礫流の成長・発達に重要であることを示している。

(2) 侵食した礫群を body 部より head 部に取り込む機構

本研究では、head 部を運動する粒子(図-3における黄色い粒子)と body 部を運動する粒子(図-3における青色の粒子)を区分し、それぞれにおいて個々の粒子に作用する力(流体力、接触力、重力、合力)を重力で無次元化し、それを足し合わせて head 部、body 部それぞれを運動する粒子の個数で除すことで平均した無次元力を評価している(式(1))。

$$\bar{F}_h = \frac{\sum_k^{N_h} \left(\frac{F_k}{\rho_s V_k g} \right)}{N_h}, \bar{F}_b = \frac{\sum_k^{N_b} \left(\frac{F_k}{\rho_s V_k g} \right)}{N_b} \quad (1)$$

ここに、 \bar{F} : 平均した無次元力、 F_k : 粒子 k に作用する力、 ρ_s : 粒子の密度、 V_k : 粒子 k の体積、 g : 重力加速度、 N : head 部もしくは body 部を運動する粒子の個数であり、添え字 h : head 部の粒子、 b : body 部の粒子を示す。図-5に、石礫流 head 部を構成する粒子群と body

部を構成する粒子群それぞれに作用する流下方向(x方向)の平均無次元合力、平均無次元流体力、平均無次元接触力それぞれの時間変化を示す。図-5より、石礫流 head 部の発達段階である 5~15 秒の間に着目すると、無次元接触力は流下方向とは逆向きに作用し、その大きさは body 部の方が head 部よりも小さい。一方で、無次元流体力は流下方向に作用し、その大きさは head 部と body 部で有意な差はない。接触力、流体力、重力の和である合力としては、head 部の粒子群より body 部の粒子群の方が大きい力を受けていることがわかる。body 部を運動する粒子は、運動の抵抗となる接触力が小さくなることで無次元合力が head 部よりも大きくなり、head 部よりも相対的に早く流下することにより head 部に取り込まれている。

(3) 礫群の取り込みによる石礫流 head 部の流れ場の変化と取り込まれた石礫粒子の運動機構

図-6に、10秒時点と15秒時点における水深平均した

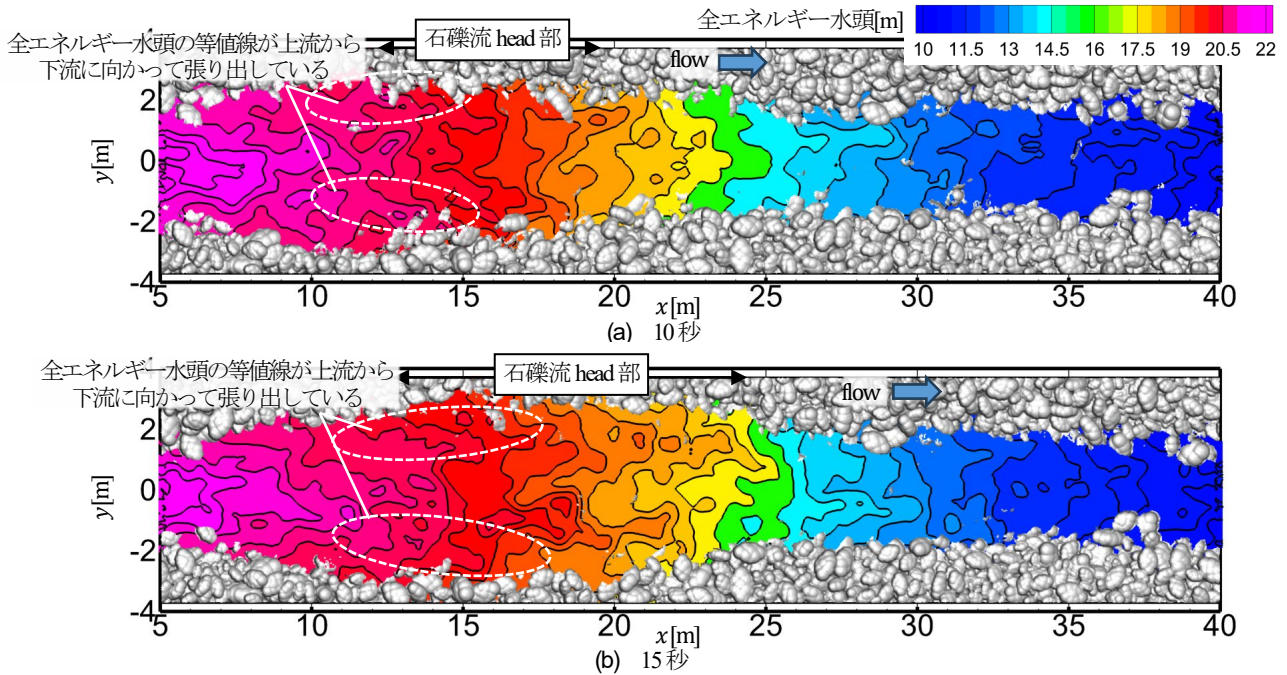


図-9 縦横断0.5mのスケールで空間平均した石礫流の全エネルギー水頭の縦横断分布

石礫流の密度分布を示し、図-7には、10秒時点と15秒時点における石礫流の水深平均流速分布を示す。10秒時点から15秒時点にかけて石礫流 head部の粒子群の総質量が増加している(図-4)ものの、石礫流の水深平均流速は head部で小さく、body部で大きいという特徴は変わらない。また、石礫流 head部を運動する粒子群は水路中央を運動し、水際近くで水深平均流速が大きくなっている。15秒時点では、head部の粒子群が水路中央を運動する特性が強くなり、head部先端付近においても特に左岸側で水深平均流速が大きくなっている。一方、body部においては水路中央で水深平均流速が大きくなっている。

図-8に、10秒時点の水路中央断面における石礫流 head部の流速コンター図を示す。図-8は流動層のみを示しており、静止粒子及び静止堆積層は表示していない。また、図中の閉曲線は移動粒子を示している。移動粒子内部の流速は、個別要素法により解かれた並進と回転を考慮した粒子速度である。x=18.75[m]付近では、石礫粒子が水面付近に位置しており、その影響を受け、流速は水面付近で小さく溪床付近で大きくなっている。一方で、x=15.50[m]付近では移動粒子が溪床付近に位置しているため、水面で大きく溪床で小さくなる流速分布が形成されている。このように、石礫流 head内部の流速分布は石礫粒子の大きさの影響を強く受けており、大粒径の石礫粒子が運動している場合には流体-粒子間の相互作用が重要であることを示している。

4. 溪岸・溪床侵食した礫群を取り込むことによる石礫流の全エネルギー水頭分布の変化

3章では、APM法を用いた三次元石礫流運動の数値実験より得た局所的な流速や圧力の値を式(2)に代入することにより、局所的なエネルギー水頭Hを評価し、式(3)より、底面から水面までのエネルギー水頭分布を考慮した全エネルギーH_{all}を求める。

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho(x, y, z, t)g} + z \quad (2)$$

$$H_{all}(x, y, t) = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (3)$$

ここに、H：石礫流の局所的なエネルギー水頭、H_{all}：石礫流の全エネルギー水頭、u, v, w：それぞれx, y, z方向の局所的な流速、p：圧力、ρ：石礫流(混相流)の密度、h：局所水深、g：重力加速度、z：基準からの高さ、z_s：水位、z_b：溪床・溪岸高さであり、本研究では数値実験水路床下流端をz=0[m]としている。式(3)の積分範囲は、図-8に示す流動層であり移動粒子を含む。各計算セル内に移動粒子(固相)が含まれる場合には各セル内で体積平均された密度ρや質量平均された流速u, v, wを用いてエネルギー水頭を評価している。ここで、式(3)は式(2)より得た局所的なエネルギー水頭Hを水深平均しているが、式(3)より求めたH_{all}を水深平均エネルギー水頭とは呼ばず、全エネルギー水頭と呼ぶ。このことは以下の理由による。石礫流内部の流れ場は三次元的に複雑な流速分布、圧力分布を有しており、断面内の各位置で異なる運動エネルギーや圧力エネル

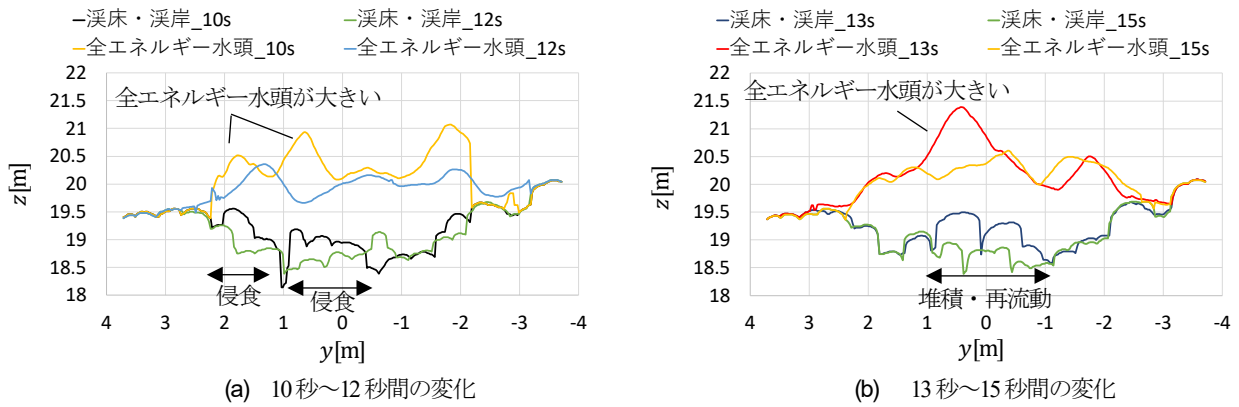


図-10 13m地点における溪床・溪岸形状と全エネルギー水頭の横断分布の時間変化

ギーを持っており、これら三次元分布を取り込んで石礫流のもつエネルギー水頭分布の時空間変化を検討することが本研究の狙いであり、始めから水深平均された流速 U, V, W を用いて求めたエネルギー水頭と区別するためである。図-1は、式(3)より求めた水面と全エネルギー水頭の瞬間分布を可視化したものである。

図-9に、10秒、15秒時点における石礫流の全エネルギー水頭の縦横断分布図を示す。石礫流の流動をエネルギー的に捉える場合には、空間的に広がりを持って考えることが重要である。石礫粒子を駆動するために生じるエネルギー水頭差の分布は、粒径程度のスケールで見ると考えられる。そのため本報では、平均粒径に相当する0.5mスケールで空間平均して石礫流の流動機構についてエネルギー的に議論する。上流と下流では標高差があるため、全体的には全エネルギー水頭は上流が大きく、下流に向かって小さくなる分布をしている。局所的に見ると、全エネルギー水頭の等値線が上流から下流に向かって張り出す分布が形成されている箇所がある。福岡・加藤⁹⁾は、この分布形を「エネルギー水頭の尾根」と呼んでおり、このような分布形が形成されている箇所は周囲と比較して全エネルギー水頭が大きいことを示している。図-9より、各時間ともに左右の溪岸付近で全エネルギー水頭の尾根が形成されており(白い点線で囲われた箇所)、石礫流head部上流側において溪岸近くの全エネルギー水頭が周囲と比較して大きくなっている。石礫流head部に集積した粒子群の影響をうけて溪岸付近で水深平均流速が大きくなる流れ場が形成されることにより(図-7)、このような全エネルギー水頭の縦横断分布形が形成されていると考えられる。

図-10に、 $x = 13[m]$ 地点における溪谷と全エネルギー水頭の横断形の時間変化を示す。図-10における全エネルギー水頭も図-9同様に空間平均している。 $x = 13[m]$ 地点において、15秒時点くらいまでは石礫流head部が通過中である。図-10(a)より、10秒時点では、 $y = 0.6[m]$ や $2.0[m]$ 付近では全エネルギー水頭が大きくなっており、

この地点では、10秒時点～12秒時点にかけて溪床・溪岸が侵食されている。侵食され断面形が変化した結果、12秒時点の全エネルギー水頭は横断的に変動が小さい分布となっている。次に12秒時点(図-10(a))から13秒時点(図-10(b))にかけて水路中央付近で約1.0m堆積が生じている。その結果、 $y = 0.5[m]$ 付近で13秒時点のエネルギーが増大し、石礫粒子の堆積による局所的な全エネルギー水頭の高まりが起こっている。その後の15秒時点では、12秒～13秒で堆積した粒子群が再流動し、12秒時点程度の溪床高さに戻っている。全エネルギー水頭も横断的に変動が小さい分布形に戻っており、石礫粒子群の再流動により貯留されていたエネルギーが解放されている。エネルギーの時空間的な貯留・解放と粒子群の侵食・堆積、再流動が間欠的に発生し、石礫流は成長・発達している。

このように、石礫流の流動は、APMモデルで表現される三次元流れと石礫群の運動の相互作用を及ぼしながら周辺の石礫を巻き込み、振り落とし流下発達していく。このプロセスは、系外から崩落石礫の流入によりエネルギー的に不連続な特徴を持っている。このような石礫流流下の全体像はAPMモデルから求めた物理諸量を用い、三次元エネルギーの方程式に基づいて考察することの重要性が示された。

5. まとめ

本報では、前報⁷⁾で行った三次元石礫流数値実験結果を用いて、石礫流内部の三次元的な流速場や粒子運動、エネルギー分布について検討し、考察した。まず、運動量の観点から、前報では、溪床・溪岸粒子群が侵食されるタイミングについて明らかにした。本報では、動き出した粒子群がbody部からhead部へと輸送され、石礫流head部が成長する機構を運動量の観点から明らかにした。さらに、エネルギーの観点から、前報では一次元的な検討より石礫流は、石礫粒子群が溪床に堆

積し、再流動することに伴うエネルギーの貯留・解放機構を有することを示したが、本報では、さらに石礫流の持つエネルギーの三次元分布に基づき石礫流の流下・発達機構について検討した。渓岸粒子群の崩落によって渓床に堆積することにより局所的に石礫流のエネルギーが高まり、高まったエネルギーによって堆積した石礫粒子群が再流動するとエネルギーが解放されるといったエネルギーの貯留・放出過程が石礫流の重要な流下機構であることを明らかにした。

REFERENCES

- 1) 欧国強, 小橋澄治, 水山高久: 土石流の発達過程に関する研究, 新砂防, Vol.46, No.3(188), 1993. [Cuogiang,O., Kobashi,S. and Mizuyama,T.: Development processes of debris-flow, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol.46, No.3(188), 1993.]
- 2) 江頭進治, 本田尚正, 伊藤隆郭, 有村真一: 土石流による河床侵食に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 641-646, 1999. [Egashira,S., Honda,N., Itoh,T. and Arimura,S.: Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow, Annual journal of hydraulic engineering, Vol.43, pp. 641-646, 1999.]
- 3) Pudasaini,S.P. and Krautblatter,M.: The mechanics of landslide mobility with erosion, nature communications, pp. 1-15, 2021.
- 4) 福田朝生, 福岡捷二: 凸型の構成フレームを持つ砂防堰堤による流木を含む高精度数値解析法を用いた土石流捕捉効果の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, pp.I1177-I_1182, 2020. [Fukuda,T. and Fukuoka,S.: Investigation of the effect of trapping debris flow of open check dams with convex steel frames by using high-resolution simulations of debris flow including driftwood, Japanese Journal of JSCE, Ser.B1(hydraulic Engineering), Vol.76, No.2, pp.I1177-I_1182, 2020.]
- 5) 福岡捷二: 超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体設計の考え方, 河川技術論文集, 第 29 号, pp.209-214, 2023. [Fukuoka,S.: Integrated Design of Levee and River Channel Based on Three Dimensional Energy Distributions of Excess Floods, Advances in River Engineering, Vol.29, pp.209-214, 2023.]
- 6) 福岡捷二, 加藤宏季: 超過洪水流の時空間三次元エネルギー分布に基づく河道計画・設計法, 河川技術論文集, 第 30 巻, 2024. [Fukuoka,S. Kato,H.: channel planning and design method based on spatio-temporal three-dimensional energy distribution of excess flood, Advances in River Engineering, Vol.30, 2024.]
- 7) 加藤宏季, 福岡捷二: 石礫流による渓床・渓岸侵食に関する研究, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16051, 2024. [Kato,H. and Fukuoka,S.: Study on the valley beds and banks erosion by debris flows, Japanese Journal of JSCE, Vol.80, No.16, 23-16051, 2024.]
- 8) Fukuoka, S.,Fukuda,T. and Uchida,T.: Effects of size and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, Advances in Water Resources,72,pp.84-96,2014.
- 9) Fukuda,T.and Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources, 129, pp.297-310, 2019.
- 10) 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆: 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.635-640, 1999. [Itoh,T., Egashira,S., Miyamoto,K. and Takuchi,H.: Transition of debris flows over rigid beds to over erodible beds, Annual journal of hydraulic engineering, Vol.43 pp.635-640, 1999.]

(Received May 31, 2024)

(Accepted September 15, 2024)

STUDY ON MECHANISMS OF FLOW AND DEVELOPMENT OF DEBRIS FLOWS BASED ON SPATIO-TEMPORAL THREE-DIMENSIONAL ENERGY DISTRIBUTION

Hiroki KATO and Shoji FUKUOKA

This study aims to open up new horizons in the study of debris flows by examining the mechanisms of debris flow with erosion of valley beds and banks by debris flows from the viewpoints of both momentum and energy. First, the mechanism of growth and development of the debris flow head were clarified from the viewpoint of momentum by incorporating eroded gravel particles and the effect of the incorporation of gravel particles on the flow field of the debris flow head. Next, to obtain an overall view of the field of the debris flow, the temporal and spatial variation of the flow and gravel analyzed by the APM method was used to examine the energy perspective. The energy storage and release processes, such as the localized increase in the energy of the debris flow due to erosion and collapse and the accumulation of gravel and stones, and the release of the energy when the accumulated gravel particles are re-moved by the increased energy, were found to be important mechanisms of the debris flow.